

Kümelerin X-Işın Işınımı

- 1970 yılında fırlatılan Uhuru X-ışın uydusunun en önemli keşfi **büyük kütleli galaksi kümelerinden gelen X-ışın ışınımının tespit edilmesiydi.**
- Üstte Coma galaksi kümesi gösterilmektedir. Coma kümesi **tamamen rahatlamış bir küme** olarak göz önünde bulundurulmaktadır. Barındırdığı farklı alt-gruplar X-ışını radyasyonunda görünmektedir.
- Ortada gösterilen RXJ 1347-1145 kümesi **X-ışın bölgesindeki en parlak küme** olarak bilinmektedir. Kütle çekim merceğiyle oluşan yayların analiziyle bu kümenin büyük bir kütleye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.
- Alttaki ise $z=0.83$ 'de yer alan MS1054-03 kümesinin optik bir görüntüsü ile X-ışın emisyonunun üst üste binmesi gösterilmektedir.

X-Işın Işınımının Genel Özellikleri

- Galaksi kümeleri, aktif galaksi çekirdeklerinden sonraki en parlak ekstragalaktik X-ışın kaynaklarıdır.
- Karakteristik ışınım güçleri en büyük kütleli kümeler için $L_x \approx 10^{43}$ ile 10^{45} erg/s arasındadır.
- Kümelerden gelen bu X-ışın emisyonu boyutsal olarak geniş bir bölgede gelmektedir, yani bireysel galaksiler tarafından üretilmezler.
- Bu ışınımın tespit edilebildiği uzaysal bölge 1 Mpc veya daha geniş bir boyuta sahiptir.
- Bununla birlikte, kümelerden gelen X-ışın ışınımı gözlem yapılan zaman ölçeklerinde (≤ 30 yıl) değişmez. Işınım genişlemiş bir bölgeden kaynaklanıyor olsa bile değişim beklenmemektedir.
- Galaksilerarası ortam içerisindeki gazın tayfı, temel olarak ısısal bremsstrahlung ve çizgi salması olarak iki bileşenden meydana gelmektedir.
- Isısal bremsstrahlung, tayfa kabaca bir süreklilik bileşeni olarak kendisini gösterir.
- Sıcaklığın $T \geq 3 \times 10^7$ K olduğu yüksek sıcaklıklarda, ısısal bremsstrahlung baskın salma mekanizmasıdır.
- Buna karşılık, daha düşük sıcaklıklarda, X-ışını salması baskın olarak çizgilerden ileri gelir.

Çizgi Emisyonu

- X-ışın emisyonunun sıcak ve yaygın bir gazdan (küme içi ortam) ortaya çıktığı varsayımı, kümelerin X-ışın tayfındaki çizgi emisyonunun keşfedilmesiyle doğrulanmıştır.
- Büyük kütleli kümelerde en baskın çizgi 7 keV civarında bulunmaktadır ki bu 25 kat iyonize demire (Fe K çizgisi) aittir.
-
- Nispeten daha az iyonize olmuş demirin $E \sim 6.4$ keV'luk biraz daha düşük enerjilerde güçlü bir geçişi vardır.
- Fe K çizgi kompleksine ek olarak, tayfta çok sayıda daha düşük enerjilere ait çizgiler de bulunmaktadır.
- Kural olarak, gaz ne kadar sıcaksa o kadar tamamen iyonize olur ve emisyon çizgisi de o kadar zayıftır.
- Göreceli olarak düşük sıcaklıklara, $k_B T \lesssim 2$ keV, sahip kümelerin X-ışın emisyonunda, bazen yüksek dereceden iyonize olmuş atomlardan kaynaklanan çizgi emisyonu hakim olmaktadır (C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca)

- Gazın **kökeni tam olarak belli olmamakla** birlikte, bu gazın metal bakımından zenginleştirilmesi sürecinin, kümenin ilk oluşum zamanlarında meydana gelmediği düşünülmektedir.
- Bir miktar gaz büyük kütleli yıldızlar tarafından işlenerek süpernova patlamaları ile küme içi ortama salınmış olmalıdır. Bilindiği gibi süpernova patlamaları ağır elementler üreten en temel süreçtir. Bu elementler, galaksiler arası rüzgarlar ve süpernovanın patlamasından ileri gelen basınç etkisiyle küme içi ortama yayılmaktadır.
- Ayrıca kümenin oluşumu esnasında bir miktar gaz genç galaksilerden koparılmış olabilir.
- **Metal bolluğu, galaksi kümelerinin kimyasal evrimiyle ilgili önemli bilgiler vermektedir.**
- **Bu metal bollukları, X-ışını tayflarından ölçülebilir.**
- Böylelikle belirlenecek Fe bolluğu, kümede oluşmuş süpernovaların (SN: Süpernova) türünü belirleme imkanını sunar (Tip I veya Tip II).
- **Fe bakımından fakir kümelerde metal bollukları Tip II süpernovalar yoluyla üretilmektedir.**
- **Eğer Fe bolluğu, Si bolluğundan çok daha fazla ise bu durum Tip Ia süpernovalarının baskın olduğuna işaret etmektedir.**

- Güneş bolluğuna göre;

SNI türü için:

$$\begin{aligned}O &\approx Mg \approx 0.035Fe \\Ne &\approx 0.006Fe \\Si &\approx S \approx Ar \approx Ca \approx 0.5Fe \\Ni &\approx 4.8Fe\end{aligned}$$

SNIİ türü için:

$$\begin{aligned}O &\approx Mg \approx Si \approx 3.7Fe \\Ne &\approx S \approx 2.5Fe \\Ar &\approx Ca \approx Ni \approx 1.7Fe\end{aligned}$$

oranları açığa çıkmaktadır.

- Bu bolluk oranları galaksilerin oluşturduğu SN'ların türünü belirlemede kullanılabilir.
- Tip Ia patlamaları sonunda en fazla Ni ve Fe meydana gelirken, SNIİ'de O, Mg, Si ve S daha fazla açığa çıkar.
- Ayrıca, ilk çalışmalar sırasında sıcak gazla ilgili önemli bir ipucu bulunmuştur. **Buna göre, eğer bu gaz Büyük Patlama'dan kalmış olsaydı, sadece hidrojen ve helyumdan meydana gelmeliydi.**
- Ancak, **Fe bolluğunun neredeyse (hidrojene nazaran) Güneş'teki bolluğunun yarısı olduğunun bulunması, bu gazın yıldızlar tarafından oluşturulduğunun ve sonradan çeşitli nedenlerle galaksilerden ayrılarak küme içi ortama saçıldığının bir kanıtıdır.**

X-Işın Emisyonunun Morfolojisi

- X-ışın emisyonunun morfolojisinden **düzenli ve düzensiz kümelerin ayrımı** yapılabilmektedir.
- Düzenli kümeler, kümenin optik merkezini merkez alan düzgün bir parlaklık dağılımı göstermektedir. Bu dağılım küme dışına doğru gidildikçe azalmaktadır. Tipik olarak, düzenli kümeler yüksek X-ışın ışınım gücüne (L_x) ve yüksek sıcaklıklara sahiptirler.
- Öte taraftan, düzensiz kümeler ise birçok maksimum parlaklık değerine sahip olabilirler. Bu maksimumlar genellikle galaksi kümeleri veya galaksi altgruplarını merkez almaktadır. Düzensiz kümelerden bazıları, gazın şok dalgalarıyla ısıtıldığı kümeler arasındaki birleşme süreçlerinin bir sonucu olarak yüksek sıcaklık gösterebilirler.
- Ayrıca düzenli kümelerle karşılaştırıldığında, düzensiz kümeler daha düşük bir merkezi galaksi yoğunluğuna sahiptirler.
- Baskın bir merkezi galaksiye sahip galaksi kümeleri genellikle X-ışın emisyonunda güçlü bir merkezi pik gösterirler.

Solda kırmızıya kayma değeri $z = 0.009$, X-ışın sıcaklığı $T = 1.07$ keV ve virial kütlesi $M_{200} = 0.32h^{-1} \times 10^{14} M_{\odot}$ olan NGC5044 galaksi grubu

Sağda, $z = 0.02$, X-ışın sıcaklığı $T = 1.71$ keV ve virial kütlesi $M_{200} = 0.5h^{-1} \times 10^{14} M_{\odot}$ olan MKW4 grubu

Sol: $z = 0.053$, X-ışın sıcaklığı $T = 9.5$ keV ve virial kütlesi $M_{200} = 5.6h^{-1} \times 10^{14} M_{\odot}$ olan A0754 kümesi

Sağ: $z = 0.056$, X-ışın sıcaklığı $T = 7.0$ keV ve virial kütlesi $M_{200} = 0.5h^{-1} \times 10^{14} M_{\odot}$ olan A3667 kümesi gösterilmektedir.

Soğuma Akımları

- XMM-Newton ve Chandra uydularına ait gözlemler, çoğu durumda küme içerisinde tek bir sıcaklığın olduğu varsayımı ile örtüşmeyen belirgin sıcaklık gradiyentleri olduğunu ortaya çıkarmıştır.
- Yani küme içi gaz çoğunlukla eş-sıcaklıklı değildir.
- Bununla birlikte, en azından merkezin dış kısımlara göre daha yoğun ve sıcak olması gerektiği, bundan dolayı merkezden dışarıya sıcaklığın düzgün bir şekilde azalması gerektiği düşünülebilir. Ancak durum böyle değildir !!!

- Merkezdeki daha sıcak ve yoğunluğu düşük olan gaz, X-ışını yayarak iç enerjisini kaybeder.
- Dolayısıyla soğur, yoğunlaşır, basıncı düşer ve üst katmanlara sağladığı termal destek miktarı azalır.
- Sonuç olarak, dış bölgeler soğuyan iç bölgenin üzerine çökerler.
- Bu çökme **soğuma akımı** olarak adlandırılmaktadır.
- Bundan ötürü dengeye ulaşmış kümeler, **genellikle soğuk çekirdeklere, sıcak orta bölgelere ve bu noktadan sonra dışarıya doğru azalan bir sıcaklık gradyentine** sahiptirler.

A2029 kümesinin radyal sıcaklık profilinde izlenen soğuma akımı

- Soğuma akımının **X-ışın parlaklığı ve çekirdek soğutma yarıçapı** gözlenerek, merkezi bölgede yoğunlaşan gaz miktarı hesaplanır.
- Bu tahminler, yılda $2 M_{\odot}$ ile $800 M_{\odot}$ arasında değişen kütle birikim hızı olduğunu göstermektedir.
- Galaksinin ömrü boyunca, toplamda $M > 10^{10} M_{\odot}$ kadar yığılma meydana gelir.
- Peki bu kütle nereye gitmektedir?

- Herhangi bir yıldızlararası bulutta olduğu gibi, bu kütleden bir miktar yıldız oluşumu beklenmektedir.
- Soğuma akımının merkez bölgesinin gözlemleri bu oluşumda düşük kütleli yıldızların yüksek kütleli yıldızlara tercih edildiğini göstermektedir.
- Soğuma akımıyla oluşturulan yıldızların kütlelerinin maksimum $1 M_{\odot}$ ile $2.5 M_{\odot}$ aralığında olduğu görülmektedir.
- Ayrıca, bu içe doğru olan akımdan küresel kümelerin oluştuğu da öne sürülmektedir.
- Ayrıca, gazın bir kısmının, AGN'ye güç katan maddeyi oluşturan, kompakt bir nesne üzerinde biriktiği söylenebilir.
- Akımın merkez bölgesinden az miktarda ekstra mavi ışınım gelmektedir ki bu ışınım merkezi bir AGN tarafından oluşturulan bir radyo lobu boyunca pik yapmaktadır.
- Soğuma akımlarında bulunan merkezi galaksilerin %71'i güçlü radyo kaynaklarıdır.

Soğuk Cepheleer

- Bir çok kümenin gaz sıcaklık ve yoğunluk profillerinde **keskin, yay şekilli ve kenar benzeri yapılar** olduğu bulunmuştur.
- **Soğuk cepheleer** (cold fronts) olarak adlandırılan bu yapılar kendilerini yüksek çözünürlüklü X-ışını görüntülerinde **belirgin parlaklık süreksizlikleri olarak göstermekte ve farklı entropilere sahip gaz bölgelerinin birbirine değdiği keskin sınırlar** olarak tanımlanmaktadır.
- Galaksi kümeleri, kütle çekimsel olarak içeriye düşme ve daha küçük yapıların birleşmesiyle gittikçe büyümektedirler.
- Bu birleşmeler (merger) esnasında, oldukça büyük miktarlarda kinetik enerji açığa çıkmaktadır ($10^{63} - 10^{64}$ erg) ve bu enerji, şok dalgaları şeklinde küme içi ortamın içerisine yayılarak, küme içerisindeki gazın sıcaklık ve entropisinde bölgesel farklılıklar yaratmaktadır.
- Soğuk cepheleer, **iki kümenin birleştiği dengeye ulaşmamış sistemlerin yanı sıra, dengeye ulaşmış kümelerde** de bulunabilir. Bu yapıların incelenmesi, **kümenin evrim aşaması, küme geometrisi ve birleşmenin hızı** hakkında bilgiler içermektedir.
- Ayrıca, **soğuma akımlarının, türbülans hareketlerinin ve termal iletimin bozulması** gibi küme içi ortamda gerçekleşen fiziksel süreçlere de ışık tutmaktadırlar.

Kümelerin Kompozisyonu

- Kümelerin kütlesi 3 bağımsız yöntem, **hız dağılımı**, **X-ışın emisyonu** ve **kütle çekim kırılması**, ile tahmin edilebilmektedir.
- Kütle ölçümünün yanı sıra, bu 3 yöntem bir kümenin farklı bileşenleri olan **galaksiler**, **gaz** ve **karanlık madde** ile ilgili de bilgi sağlamaktadır.
- Sonuçlar, kümenin toplam kütlesinin yalnızca **küçük bir yüzdesinin galaksiler**, **%10-%25'inin küme içi ortam ve kalan %70-%90'ının ise karanlık madde** tarafından oluşturulduğunu ileri sürmektedir.
- Ortaya çıkan resim, **galaksileri çevreleyen ve aralarındaki boşluğa yayılan geniş bir gaz bulutu ve karanlık maddedir**.
- Galaksiler, küme içi gaz ve karanlık maddenin boşlukta aynı bölgeyi kapladıkları gerçeği şaşırtıcı değildir.
- Ancak, bu durum karanlık maddenin olmadığı ve karanlık madde olarak atfedilen etkilerin aslında **çok büyük ölçeklerde kütle çekim kuvvet yasasında** veya çekim kuvvetine tepki **olarak maddenin hareket etme şeklinde** meydana gelen bir değişiklikten kaynaklandığı şeklinde alternatif bir yoruma izin vermektedir.
- Bu alternatif hipotezin testi eğer küme içi gaz ve karanlık maddenin ayrılabilceği bir durum olması halinde sağlanabilecektir.

- Bazı nadir kümeler böylesine bir ortamı sağlayabilir gibi görünmektedir ve çarpışmalar bu kümeleri anlamak için anahtar rol oynamaktadır.
- Diğer taraftan karanlık madde, yalnızca kütle çekim etkileri yoluyla etkileşimde bulunacaktır.
- Bu yüzden, **karanlık madde böylesine bir çarpışmaya dahil olan galaksilerarası gaz basıncındaki değişikliklerden etkilenmeyecektir.**
- Dolayısıyla, **iki kümeyle ilişkili olan karanlık maddenin birbirleri içinden çarpışmadan geçeceği beklenmektedir.**
- X-ışın salan gazın karanlık maddeden ayrılıp ayrılmadığını inceleyecek çok az sayıda çarpışan galaksi mevcuttur.

Mermi (Bullet) Kümesi

- Galaksi kümeleri, büyük ölçeklerde hidrodinamik ve plazma fiziksel süreçlerini anlamak için harika laboratuvarlardır.
- Örneğin birleşen kümeler gibi kümelerdeki şok cepheleri, soğuk cepheler ve ses dalgalarının yayılımı gözlenebilir.
- Şekilde gösterilen 1E0657-56 kümesi, diğer adıyla Mermi kümesi bilhassa iyi bir örnektir.
- Küme merkezinin sağına doğru güçlü ve nispeten yoğun X-ışın emisyonu (mermi) görünmekteyken buranın daha sağında yüzey dağılımında yay şeklinde bir süreksizlik görülmektedir.
- Bu süreksizliğin her iki tarafındaki sıcaklık dağılımından bunun bir **şok cephesi** olduğu sonucuna varılmaktadır.
- Bu şokun gücü, merminin 3500 km/s hızla kümedeki galaksilerarası ortama doğru (şekilde soldan sağa) hareket ettiğini göstermektedir.
- Bu gözlem, daha **düşük kütleli bir kümenin daha büyük kütleli başka bir kümenin içinden geçtiği** (şekilde soldan sağa) iki kümenin birleşmesi şeklinde yorumlanmaktadır.

- Şekildeki “mermi”, düşük kütleli kümenin hala oldukça yoğun olan merkez bölgesinden gelen gazdır.
- Bu yorum, şok cephesinin sağında bulunan ve muhtemelen daha düşük kütleli kümenin eski üye galaksileri olan galaksi grubu tarafından desteklenmektedir.
- Bu küme, daha büyük kütleli olan kümenin içinden geçerken, sahip olduğu galaksiler ve karanlık madde çarpışmadan hareket ederken. gaz büyük kütleli kümedeki gazla sürtünerek yavaşlar.
- Böylece galaksiler ve karanlık madde geride kalan gaza kıyasla küme boyunca daha hızlı hareket eder.
- Bu kümenin zayıf kütle çekim kırılma analizi, küçük küme bileşeninin kütlelerinin, mermi yakınındaki X-ışın emisyonuna neden olan küme içi gaz bileşenine değil de birbirine bağlı bir galaksi grubuna merkezlenmiş olduğunu göstermektedir.
- Bu sonuç yukarıda verilen yorum için güçlü bir ilave kanıt sağlamaktadır. Buna göre, galaksiler ve karanlık madde birlikte küme içinden geçerken çarpışmayan bir gaz gibi davranırken, gazın kendisi sürtünme nedeniyle durdurulmaktadır.